

International Journal for
Computational Civil and Structural Engineering

(Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций)

Volume 12, Issue 2

2016

EXECUTIVE EDITOR

Vladimir I. Travush, Professor,
Vice-President of Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences;
24, Ulitsa Bolshaya Dmitrovka, 107031, Moscow, Russia

EDITOR-IN-CHIEF

Vladimir N. Sidorov, Professor
Department of Advanced Mathematics
and Structural Mechanics,
Moscow Institute of Architecture (State Academy);
11/4, Building 4, Ulitsa Rozhdestvenka, Moscow,
107031, Russia

EDITORIAL DIRECTOR

Valery I. Telichenko, Professor,
The First Vice-President of Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences;
24, Ulitsa Bolshaya Dmitrovka, 107031, Moscow, Russia

MANAGING EDITOR

Nadezhda S. Nikitina, Professor
Director of ASV Publishing House;
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337 Moscow, Russia

TECHNICAL EDITOR

Taymuraz B. Kaytukov, Associate Professor
Research & Educational Center
of Computational Simulation, National Research
Moscow State University of Civil Engineering;
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337 Moscow, Russia

ASSOCIATE EDITORS

Pavel A. Akimov, Professor
Executive Scientific Secretary of Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences;
Scientific Research Center "STADYO";
National Research Moscow State University
of Civil Engineering;
24, Ul. Bolshaya Dmitrovka, 107031, Moscow, Russia

Alexander M. Belostotsky, Professor
Scientific Research Center "STADYO";
National Research Moscow State University
of Civil Engineering;
8th Floor, 18, ul. Tretya Yamskogo Polya,
125040, Moscow, Russia

Vladimir Belsky, Ph.D.
Dassault Systèmes Simulia;
1301 Atwood Ave Suite 101W
02919 Johnston, RI, United States

Mikhail Belyi, Professor
Dassault Systèmes Simulia;
1301 Atwood Ave Suite 101W
02919 Johnston, RI, United States

Vitaly Bulgakov, Professor
Parametric Technology Corp.;
57 Metropolitan Av.,
Ashland, MA, USA

Nikolai P. Osmolovskii, Professor
Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences;
Kazimierz Pulaski University
of Technology and Humanities in Radom;
29, ul. Malczewskiego, 26-600, Radom, Poland

Gregory P. Panasenko, Professor
Equipe d'Analyse Numerique
NMR CNRS 5585
University Gean Mehnet;
23 rue. P.Michelon 42023, St.Etienne, France

Leonid A. Rozin, Professor
Department of Structural Mechanics,
Peter the Great Saint-Petersburg
Polytechnic University;
29, Ul. Politechnicheskaya,
195251 Saint-Petersburg, Russia

ADVISORY EDITORIAL BOARD & REVIEWERS

Robert M. Aloyan, Professor
Ivanovo State Polytechnical
University; 20, Ulitsa 8 Marta,
Ivanovo, 153037, Russia

Vladimir I. Andreev, Professor
National Research Moscow State
University of Civil Engineering;
Yaroslavskoe shosse 26, Moscow,
129337, Russia

Mukhtaritdin M. Batdalov, Professor
Makhachkala Branch of Moscow
Automobile and Road State
Technical University (MADI);
1. Imam Shamil Avenue,
Makhachkala, Russia

Klaus-Jurgen Bathe, Professor
Massachusetts Institute
of Technology;
Cambridge, MA 02139, USA

Alexander T. Bekker, Professor
Far Eastern Federal University;
8 Suhanova Street, Vladivostok,
690950, Russia

Jan Buynak, Professor
University of Žilina; 1, Univerzitná,
Žilina, 010 26, Slovakia

Evgeniy M. Chernishov, Professor
Voronezh State University of
Architecture and Civil Engineering;
84, 20 Let Oktyabrya st., Voronezh,
394006, Russia

Vladimir T. Erofeev, Professor
Ogarev Mordovia State University;
68 Bolshevistskaya Str., Saransk
430005, Republic of Mordovia,
Russia

Victor S. Fedorov, Professor
Moscow State University of Railway
Engineering; 9, Obratsova Street,
Moscow, 127994, Russia

Sergiy Yu. Fialko, Professor,
Cracow University of Technology;
24, Warszawska Street, Kraków,
31-155, Poland

Alexander S. Gorodetsky, Professor
LIRA SAPR Ltd.;
Office 212, 7a Kiyanovsky side street
(pereulok), Kiev, 04053, Ukraine

Vyatcheslav A. Ilyichev, Professor
Russian Academy of Architecture
and Construction Sciences;
24, Ulitsa Bolshaya Dmitrovka,
Moscow, 107031, Russia

Marek Iwański, Professor,
Kielce University of Technology;
7, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego
Kielce, 25 – 314, Poland

Sergey Yu. Kalashnikov, Professor
Volgograd State University of
Architecture and Civil Engineering;
1, Academicheskaya Street,
Volgograd, 400074, Russia

Nikolay I. Karpenko, Professor
Research Institute of Building
Physics; 21, Locomotive Travel,
Moscow, 127238, Russia

Vladimir V. Karpov, Professor
Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering;
4, 2-nd Krasnoarmeiskaya Steet,
Saint Petersburg, 190005, Russia

Galina G. Kashevarova, Professor
Perm National Research Polytechnic
University; 29 Komsomolsky pros.,
Perm, Perm Krai, 614990, Russia

Vitaly I. Kolchunov, Professor
Southwest State University; 94, 50 let
Oktyabrya, Kursk, 305040, Russia

Markus König, Professor
Ruhr-Universität Bochum;
150, Universitätsstraße, Bochum,
44801, Germany

Sergey B. Kositsin, Professor
Moscow State University of Railway
Engineering; 9, Obratsova Street,
Moscow, 127994, Russia

Amirlan A. Kusainov, Professor
Kazakh Leading Academy of
Architecture and Civil Engineering;
29, Toraiyrov str., Almaty, Almaty,
050043, Republic of Kazakhstan

Sergey V. Kuznetsov, Professor
Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences;
101-1, Prosp. Vernadskogo, Moscow,
119526, Russia

Vladimir V. Lalin, Professor
Peter the Great Saint-Petersburg
Polytechnic University; 29, Ul.
Politechnicheskaya, St. Petersburg,
195251, Russia

Leonid S. Lyakhovich, Professor
Tomsk State University
of Architecture and Building;
2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003,
Russia

Rashid A. Mangushev, Professor
Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering;
4, 2-nd Krasnoarmeiskaya Steet,
Saint Petersburg, 190005, Russia

Iliyar T. Mirsayapov, Professor
Kazan State University
of Architecture and Engineering;
1, Zelenaya Street, Kazan, 420043,
Republic of Tatarstan, Russia

Vladimir L. Mondrus, Professor
National Research Moscow State
University of Civil Engineering;
Yaroslavskoe shosse 26, Moscow,
129337, Russia

Anatoly V. Perelmuter, Professor
SCAD Soft;
Office 1,2, 3a Osvity street,
Kiev, 03037, Ukraine

Alexey N. Petrov, Professor
Petrozavodsk State University;
33, Lenina Prospect, Petrozavodsk,
185910, Republic of Karelia, Russia

Vladilen V. Petrov, Professor
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov;
77 Politechnicheskaya Street,
Saratov, 410054, Russia

Jerzy Z. Piotrowski, Professor
Kielce University of Technology;
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7,
Kielce, 25 – 314, Poland

Chengzhi Qi, Professor
Beijing University of Civil
Engineering and Architecture;
1, Zhanlanlu, Xicheng District,
Beijing, China

Nikolaj N. Shaposhnikov, Professor
Moscow State University of Railway
Engineering; 9, Obratsova Street,
Moscow, 127994, Russia

Eun Chul Shin, Professor
Incheon National University;
(Songdo-dong)119 Academy-ro,
Yeonsu-gu, Incheon, Korea

D.V. Singh, Professor
Vice-Chairman all India Council
for Technical Education;
New Delhi, India

Wacław Szczeciński, Professor
Lublin University of Technology;
Ul. Nadbystrzycka 40,
20-618 Lublin, Poland

Tadatsugu Tanaka, Professor
Tokyo University; 7-3-1 Hongo,
Bunkyo, Tokyo, 113-8654, Japan

Zbigniew Wojcicki, Professor
Wroclaw University of Technology;
11 Grunwaldzki Sq., 50-377,
Wroclaw, Poland

Askar Zhussupbekov, Professor
Eurasian National University;
5, Munaitpassov street, Astana,
010000, Kazakhstan

INVITED REVIEWERS

Akimbek A. Abdikalikov, Professor, Dr.Sc.,
Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture n.a. N. Isanov;
34 Malydybayeva Str., Bishkek, 720020, Biskek, Kyrgyzstan

Vadim K. Akhmetov, Professor, Dr.Sc.
National Research Moscow State University of Civil Engineering;
26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia

Ján Čelko, Professor, PhD, Ing.
University of Žilina; Univerzitná 1, 010 26, Žilina, Slovakia

Stanislaw Jemioło, Professor, Dr.Sc.,
Warsaw University of Technology; 1, Pl. Politechniki, 00-661, Warsaw, Poland

Konstantin I. Khenokh, M.Ing., M.Sc.
Trinity Industries, Inc.; 2525 Stemmons Freeway, Dallas, Texas 75207, USA

Christian Koch, Dr.-Ing.
Ruhr-Universität Bochum;
Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen, Gebäude IA, 44780, Bochum, Germany

Gaik A. Manuylov, Professor, PhD
Moscow State University of Railway Engineering; 9, Obratsova Street, Moscow, 127994, Russia

Alexander S. Noskov, Professor, Dr.Sc.
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin;
19 Mira Street, Ekaterinburg, 620002, Russia

Nelli N. Rogacheva, Professor, Dr.Sc.
National Research Moscow State University of Civil Engineering;
26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia

Grzegorz Świt, Professor, Dr.hab. Inż.,
Kielce University of Technology; 7, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego, Kielce, 25 – 314, Poland

Josef Vičan, Professor, PhD, Ing.
University of Žilina; Univerzitná 1, 010 26, Žilina, Slovakia

Artur Zbiciak, Associate Professor
Warsaw University of Technology; 1, Pl. Politechniki, 00-661, Warsaw, Poland

AIMS AND SCOPE

The aim of the Journal is to advance the research and practice in structural engineering through the application of computational methods. The Journal will publish original papers and educational articles of general value to the field that will bridge the gap between high-performance construction materials, large-scale engineering systems and advanced methods of analysis.

The scope of the Journal includes papers on computer methods in the areas of structural engineering, civil engineering materials and problems concerned with multiple physical processes interacting at multiple spatial and temporal scales. The Journal is intended to be of interest and use to researches and practitioners in academic, governmental and industrial communities.

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЖУРНАЛЕ
International Journal
for Computational Civil and Structural Engineering

(Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций)

Международный научный журнал “*International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций)” (IJCCSE) является ведущим научным периодическим изданием по направлению «Инженерные и технические науки», издаваемым, начиная с 1999 года. В журнале на высоком научно-техническом уровне рассматриваются проблемы численного и компьютерного моделирования в строительстве, актуальные вопросы разработки, исследования, развития, верификации, апробации и приложений численных, численно-аналитических методов, программно-алгоритмического обеспечения и выполнения автоматизированного проектирования, мониторинга и комплексного наукоемкого расчетно-теоретического и экспериментального обоснования напряженно-деформированного (и иного) состояния, прочности, устойчивости, надежности и безопасности ответственных объектов гражданского и промышленного строительства, энергетики, машиностроения, транспорта, биотехнологий и других высокотехнологичных отраслей.

В редакционный совет журнала входят известные российские и зарубежные деятели науки и техники. Основным критерий отбора статей для публикации в журнале – их высокий научный уровень, соответствие которому определяется в ходе высококвалифицированного рецензирования и объективной экспертизы, поступающих в редакцию материалов.

Журнал входит в Перечень ВАК РФ ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. В Российской Федерации журнал индексируется Российским индексом научного цитирования (РИНЦ). *Журнал входит в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI), полностью интегрированную с платформой Web of Science.* Журнал имеет международный статус и высылается в ведущие библиотеки и научные организации мира.

Издатели журнала – Издательство Ассоциации строительных высших учебных заведений /АСВ/ (Россия, г. Москва) и Издательский дом Begell House Inc. (США, г. Нью-Йорк). Партнерами издания является *Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН)* и *Научно-исследовательский центр СтаДиО (ЗАО НИЦ СтаДиО)*.

Цели журнала – демонстрировать в публикациях российскому и международному профессиональному сообществу новейшие достижения науки в области вычислительных методов решения фундаментальных и прикладных технических задач, прежде всего в области строительства.

Задачи журнала:

– предоставление российским и зарубежным ученым и специалистам возможности опубликовать результаты своих исследований;

– привлечение внимания к наиболее актуальным, перспективным, прорывным и интересным направлениям развития и приложений численных и численно-аналитических методов решения фундаментальных и прикладных технических задач, совершенствования технологий математического, компьютерного моделирования, разработки и верификации реализующего программно-алгоритмического обеспечения;

– обеспечение обмена мнениями между исследователями из разных регионов и государств.

Тематика журнала. К рассмотрению и публикации в журнале принимаются аналитические материалы, научные статьи, обзоры, рецензии и отзывы на научные публикации по фундаментальным и прикладным вопросам технических наук, прежде всего в области строительства. В журнале также публикуются информационные материалы, освещающие научные мероприятия и передовые достижения Российской академии архитектуры и строительных наук, научно-образовательных и проектно-конструкторских организаций.

Тематика статей, принимаемых к публикации в журнале, соответствует его названию и охватывает направления научных исследований в области разработки, исследования и приложений численных и численно-аналитических методов, программного обеспечения, технологий компьютерного моделирования в решении прикладных задач в области строительства, а также соответствующие профильные специальности, представленные в диссертационных советах профильных образовательных организациях высшего образования.

Редакционная политика. Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении авторского права, законности, плагиата и клеветы, изложенных в законодательстве Российской Федерации, и этических принципах, поддерживаемых сообществом ведущих издателей научной периодики.

За публикацию статей плата с авторов не взимается. Публикация статей в журнале бесплатная. На платной основе в журнале могут быть опубликованы материалы рекламного характера, имеющие прямое отношение к тематике журнала.

Авторам. Прежде чем направить статью в редакцию журнала, авторам следует ознакомиться со всеми материалами, размещенными в разделах сайта журнала (интернет-сайт Российской академии архитектуры и строительных наук (<http://raasn.ru>); подраздел «Издания РААСН» или интернет-сайт Издательства АСВ (<http://iasv.ru>); подраздел «Журнал IJCCSE»): с основной информацией о журнале, его целях и задачами, редакционной политикой, порядком рецензирования направляемых в журнал статей и пр.

Подписка. Журнал зарегистрирован в Федеральном агентстве по средствам массовой информации и охраны культурного наследия Российской Федерации. Индекс в общероссийском каталоге РОСПЕЧАТЬ – 18076.

По вопросам подписки на международный научный журнал “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций)” обращайтесь в Агентство «Роспечать» (Официальный сайт в сети Интернет: <http://www.rosp.ru/>) или в издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ) в соответствии со следующими контактными данными:

ООО «Издательство АСВ»

Юридический адрес: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26, офис 705;

Фактический адрес: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1, 5 этаж, офис 12 (ТЦ Мебель России);

Телефоны: +7 (925) 084-74-24, +7 (926) 010-91-33

Интернет-сайт: www.iasv.ru. Адрес электронной почты: iasv@iasv.ru.

Контактная информация.

По всем вопросам работы редакции, рецензирования, согласования правки текстов и публикации статей следует обращаться к главному редактору журнала *Сидорову Владимиру Николаевичу* (e-mail: sidorov.vladimir@gmail.com, iasv@iasv.ru, sidorov@raasn.ru) или техническому редактору журнала *Кайтукову Таймуразу Батразовичу* (адреса электронной почты: kaytukov@raasn.ru; tkaytukov@gmail.com). Кроме того, по указанным вопросам, а также по вопросам размещения в журнале рекламных материалов можно обращаться к генеральному директору ООО «Издательство АСВ» *Никитиной Надежде Сергеевне* (адреса электронной почты: iasv@iasv.ru, nsnikitina@mail.ru, ijccse@iasv.ru).

**International Journal for
Computational Civil and Structural Engineering**

(Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций)

Volume 12, Issue 2

2016

TABLE OF CONTENTS (СОДЕРЖАНИЕ)

Напряженное состояние породного массива при воздействии полей влажности и температуры с учетом фазового перехода	<u>8</u>
<i>В.И. Андреев, А.С. Авершьев</i>	
Об одном примере расчета тонкой пластины на основе совместного применения метода конечных элементов и дискретно-континуального метода конечных элементов	<u>14</u>
<i>П.А. Акимов, О.А. Негрозов</i>	
Обзорно-аналитическое исследование нормативно-методической литературы в области мониторинга зданий и сооружений	<u>42</u>
<i>А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов</i>	
Сравнительный анализ методик численного моделирования динамики трехмерных систем «основание – арочная плотина – водохранилище» при сейсмических воздействиях	<u>65</u>
<i>А.М. Белостоцкий, Нгуен Тай Ханг Лыонг, Д.С. Дмитриев, С.В. Щербина</i>	
Численное моделирование аэроупругих колебаний тонкостенных оболочек в трехмерном воздушном потоке.	
Часть 1: Верификация механической конечноэлементной модели	<u>75</u>
<i>Е.И. Бозняков, И.Н. Афанасьева, А.М. Белостоцкий</i>	
Численное моделирование развития плоской турбулентной стесненной струи во встречном потоке	<u>86</u>
<i>В.Н. Варпаев, И.Н. Ланцова</i>	
Учет нелинейной работы железобетона в ПК ЛИРА-САПР. Метод «Инженерная нелинейность»	<u>92</u>
<i>А.С. Городецкий, М.С. Барабаш</i>	
Оптимальный состав композита по критерию его прочности	<u>99</u>
<i>В.Т. Ерофеев, А.С. Тюряхин, И.В. Смирнов, И.Н. Максимова</i>	

- Исследование, поиск и расчет оптимального конструктивного решения с разработкой проекта навеса на действующей футбольном стадионе «Казань-Арена» для проведения Чемпионата мира по водным видам спорта в 2015 году** **112**
И.Л. Кузнецов, А.В. Исаев, Р.Р. Вахтель, Л.Р. Гимранов
- Критерии оптимального усиления стенки стержней двутаврового поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой собственной частоты** **118**
Л.С. Ляхович, А.П. Малиновский, Б.А. Тухфатуллин
- Спектральный метод граничных элементов и его применение для расчета конструкций: теоретические основы и перспективы развития** **126**
Ж.И. Мсхалая, П.А. Акимов
- Теоремы о взаимности мощностей внешней нагрузки и диссипации энергии и их применение в задачах пластического деформирования круглых мембран и безмоментных оболочек при квазистатическом нагружении** **137**
А.В. Старов, С.Ю. Калашиников
- Построение алгоритмы и разработка программы для ЭВМ по вариантному проектированию пластинчато-стержневых силовых конструкций из условий жесткости пластин путем геометрического моделирования их формы** **147**
А.А. Черняев
- Численное решение задачи устойчивости панельного здания против прогрессирующего обрушения** **158**
Г.И. Шапиро, А.А. Гасанов

УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В ПК ЛИРА-САПР. МЕТОД «ИНЖЕНЕРНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ»

А.С. Городецкий^{1,2}, М.С. Барабаш^{1,3}

¹ ООО «ЛИРА САПР», г. Киев, УКРАИНА

² Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, УКРАИНА

³ Национальный авиационный университет, г. Киев, УКРАИНА

Аннотация: В статье рассматривается итерационный метод «инженерная нелинейность». Представленный метод позволяет определить реальные жесткостные характеристики сечения, которые могут быть пониженными в связи с появлением трещин, пластическими деформациями бетона и арматуры. Предлагаемый метод «инженерная нелинейность», с одной стороны, позволяет более точно учитывать распределение жесткостей, с другой стороны, по технологии практически аналогичен традиционным методам расчета в линейной постановке, т.е. позволяет выполнить расчет на все нагружения, получить расчетные сочетания усилий (PCY) и расчетные сочетания нагрузок (PCN), подбор арматуры.

Ключевые слова: жизненный цикл, компьютерное моделирование, численное моделирование, прочностной расчет, нелинейный расчет, устойчивость, напряженно - деформированное состояние, наукоемкие расчетно-теоретические исследования

NONLINEAR BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE IN LIRA-SAPR SOFTWARE. NONLINEAR ENGINEERING METHOD (NL ENGINEERING)

Aleksander S. Gorodetsky^{1,2}, Maria S. Barabash^{1,3}

¹ “LIRA SAPR” Ltd, Kiev, UKRAINE

² Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev, UKRAINE

³ National Aviation University, Kiev, UKRAINE

Abstract: In given article is considered iterative method “engineering nonlinearity”. Given method allows defining real characteristics of section stiffness that could be decreased owing to cracks occurrence, plastic deformations of concrete and reinforcement. Proposed method “engineering nonlinearity” allows on the one hand to take into account more exactly stiffness distribution, on the other hand is similar to traditional analysis methods into linear formulation, i.e. allows to perform analysis on all load-cases, obtain DCF and DCL, perform reinforcement selection.

Keywords: life cycle, computer modelling, numerical modelling, structural analysis, nonlinear analysis, stability, stress - strain state, computational researches

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ползучесть, трещины и другие специфические особенности железобетона обуславливают изменение жесткостных характеристик элементов уже на ранних этапах нагружения, включая и эксплуатационную стадию. Это

приводит к перераспределению усилий, значительному увеличению перемещений по сравнению с линейно-упругим расчетом. Нормативные документы ориентируют инженера на учет этих факторов. Так в Еврокоде и нормативах Российской Федерации рекомендуется проводить расчет с учетом фи-

зической нелинейности. Программный комплекс ЛИРА-САПР предоставляет возможность инженеру выполнять такие расчеты. Однако расчет конструкции с учетом физической нелинейности [2, 3, 6] в строгом математическом понимании этого процесса при использовании в массовых инженерных расчетах имеет ряд недостатков:

- такой расчет может быть выполнен только на одно нагружение и его нельзя использовать в РСУ или РСН;
- такой расчет требует больших ресурсозатрат – шаговый метод обуславливает необходимость многократного решения систем линеаризованных уравнений;
- такой расчет требует задания арматуры (диаметры и расположение) в каждом сечении

стержня или пластинчатого элемента.

С другой стороны, нормативы Российской Федерации СП 52-103-2007, для учета этих факторов в инженерных расчетах, предлагают просто вводить понижающие коэффициенты на жесткость для изгибаемых элементов 0,3 и сжатых 0,6. Конечно, такое грубое предположение не учитывает, что снижение жесткости зависит от величины и характера напряженно-деформированного состояния сечения. О снижении жесткости растянутых элементов вообще ничего не говорится. Такой подход достаточно грубо оценивает действительную ситуацию. Это можно продемонстрировать на примере элементарной защемленной балки (рисунок 1).

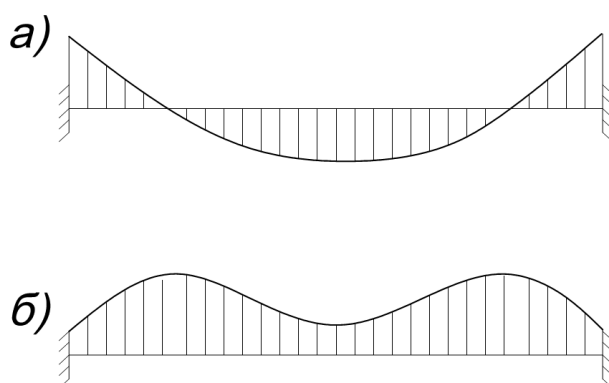


Рисунок 1. Напряженно-деформированное состояние (НДС) защемленной балки: а) эпюра моментов, б) соответствующая эпюра жесткостей.

В реальных расчетах ситуация еще более сложная: колонны зачастую испытывают значительные нормальные усилия: балки испытывают значительные изгибные усилия; в пластичных элементах как правило возникают соизмеримые мембранные и изгибные усилия.

Метод «Инженерная нелинейность» ориентирован на некоторое устранение этого несоответствия (некоторые идеи в этом направлении предлагались ранее [1]) и этот метод надо позиционировать как метод уточненного дифференцированного учета

снижения жесткостных характеристик железобетонных элементов.

КОНЦЕПЦИЯ МЕТОДА

Метод «Инженерная нелинейность» состоит в следующем:

1. Задается «определяющее нагружение», которое по мнению инженера в основном определяет напряженно-деформированное состояние конструкции (развитие трещин, пластические деформации бетона и арматуры) на протяжении жизненного цикла кон-

струкции. «Определяющее нагружение» может состояться на основании набора нагружений (собственный вес, полезные нагрузки и др.), которые задаются инженером для последующего традиционного расчета или назначается инженером на основе других предположений.

2. Производится расчет на «определяющее нагружение» в физически нелинейной постановке с одновременным подбором арматуры. Расчет выполняется итерационным методом и производится подбор арматуры.

3. В результате итерационного расчета на основе НДС каждого сечения стержня и КЭ пластинчатой конструкции определяются жесткостные характеристики.

4. Выполняется традиционный расчет конструкции, элементы которой имеют жесткостные характеристики определяемые в результате итерационного расчета. Традиционный расчет подразумевает расчет в линейно-упругой постановке на весь набор нагружений (собственный вес, полезная нагрузка, сейсмика и др.), составление РСУ или РСН, подбор или проверку сечений стержней же-

лезобетонных и стальных элементов, конструирование.

Наиболее ответственным и сложным в постановке и реализации является этап определения жесткостных характеристик сечений стержня и пластинчатого элемента [4,5].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЯ СТЕРЖНЯ

На рисунке 2 представлено произвольное сечение стержня, на которое действует два момента M_x и M_y , нормальная сила N . Моменты действуют относительно главных осей сечения x и y . Нормальная сила приложена в точке C – пересечении геометрической оси стержня с плоскостью сечения. Требуется: определить жесткостные характеристики сечения, соответствующие текущим модулям деформаций бетона и арматуры.

Зависимость σ – ϵ для бетона представлена на рисунке 3, для арматуры – на рисунке 4.

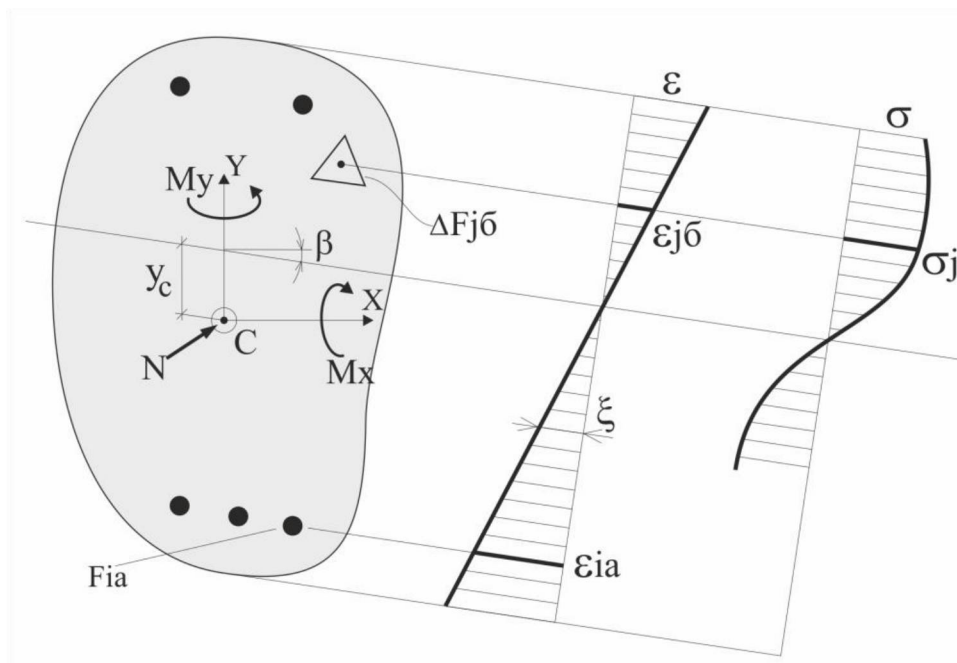


Рисунок 2. Напряженно-деформированное состояние сечения стержня.

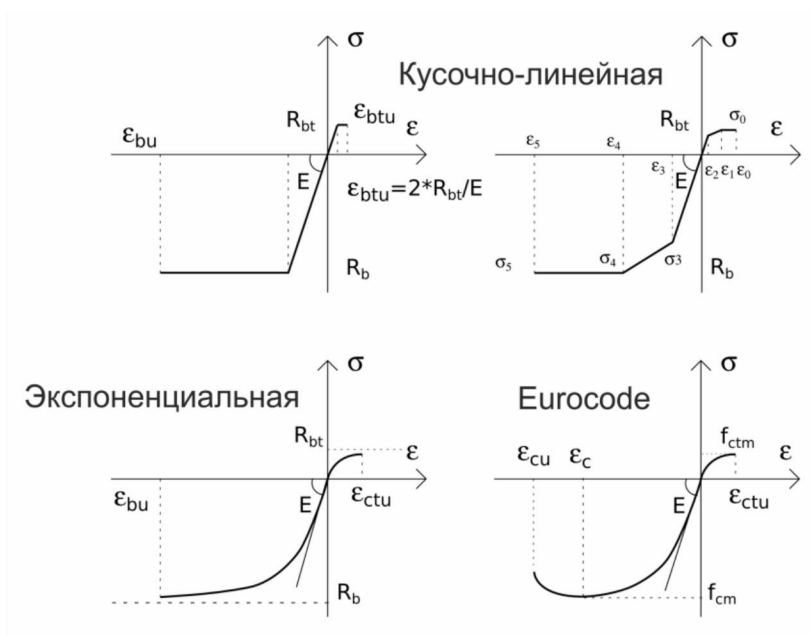


Рисунок 3. Зависимость напряжение-деформация для бетона.

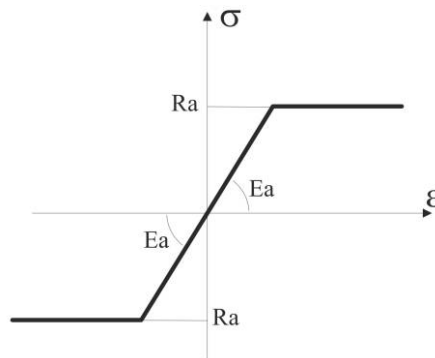


Рисунок 4. Зависимость напряжение-деформация для арматуры

Для определения НДС сечения необходимо найти положение нейтральной оси, которое характеризуется двумя величинами Y_c , β и кривизной сечения ξ (рисунок 2):

- Y_c – смещение нейтральной оси;
- β – угол поворота нейтральной оси;
- ξ – кривизна сечения.

Решение задачи выполняется численным методом. В результате итерационного процесса определяются три неизвестных Y_c , β , ξ , которые находятся из трех уравнений равновесия:

$$\sum z=0, \sum M_x=0, \sum M_y=0.$$

$$\sum z = \sum_{j=1}^n \Delta F_{j\sigma} \cdot \sigma_{j\sigma}(y_c, \beta, \xi) + \sum_{i=1}^m f_{ia} \sigma_{ia}(y_c, \beta, \xi) + N = 0$$

$$\sum M_x = \sum_{j=1}^n \Delta F_{j\sigma} \cdot \sigma_{j\sigma}(y_c, \beta, \xi) y_j(y_c, \beta, \xi) + \sum_{i=1}^m f_{ia} \sigma_{ia}(y_c, \beta, \xi) y_{ia}(y_c, \beta, \xi) + M_x + N e_x = 0$$

$$\sum M_y = \sum_{j=1}^n \Delta F_{j\sigma} \cdot \sigma_{j\sigma}(y_c, \beta, \xi) \cdot x_j(y_c, \beta, \xi) + \sum_{i=1}^m f_{ia} \sigma_{ia}(y_c, \beta, \xi) \cdot x_{ia}(y_c, \beta, \xi) + M_y + N e_y = 0$$

Жесткостные характеристики $E_{обF}$, $E_{обI_x}$, $E_{обI_y}$ определяются на основании зависимостей σ - ϵ для бетона и арматуры (рисунок 3, 4). Для бетона в определение входит только сжатая часть бетона с переменным по сечению секущим моделям деформации. Для каждого арматурного стержня также используется соответствующий модуль деформации.

$$E_{обF} = \sum_{j=1}^n E_{секj\sigma} \Delta F_{j\sigma} + \sum_{i=1}^m E_{секia} f_{ia}$$

$$E_{обI_x} = \sum_{j=1}^n E_{секj\sigma} \Delta F_{j\sigma} y_{j\sigma}^2 + \sum_{i=1}^m E_{секia} f_{ia} y_{ia}^2$$

$$E_{обI_y} = \sum_{j=1}^n E_{секj\sigma} \Delta F_{j\sigma} x_{j\sigma}^2 + \sum_{i=1}^m E_{секia} f_{ia} x_{ia}^2$$

Здесь $\Delta F_{j\sigma}$, f_{ia} – элементарные участки, на которые расчленяется сечение бетона и площади отдельных стержней арматуры.

n – количество участков бетона, m – количество арматурных стержней.

$E_{секj\sigma}$, $E_{секia}$ – секущие модули деформаций бетона и арматуры, которые определяются на основании зависимостей σ - ϵ (рисунок 2,3).

$x_{j\sigma}$, $y_{j\sigma}$, x_{ia} , y_{ia} – расстояние центра тяжести j -го участка бетона и i -го участка арматурного стержня до главных осей, положение которых (Y_c , β) определено в результате итерационного расчета.

Для бетона в определение входит только сжатая часть бетона с переменным по сечению секущим модулем деформации. Для каждого арматурного стержня также используется соответствующий секущий модуль деформации.

Матрица жесткости стержня, имеющего переменные по длине секущие жесткостные характеристики (рисунок 1) также строится численным методом (каждый стержень рассматривается как своеобразный супер элемент).

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Ниже приводятся результаты расчета рамы на основе инженерной нелинейности (рисунок 4).

В качестве определяющего нагружения была принята нагрузка $q=15$ т/п.м. на рисунке 6 приведены соответствующие жесткости для ригеля в – с и колонн а – в.

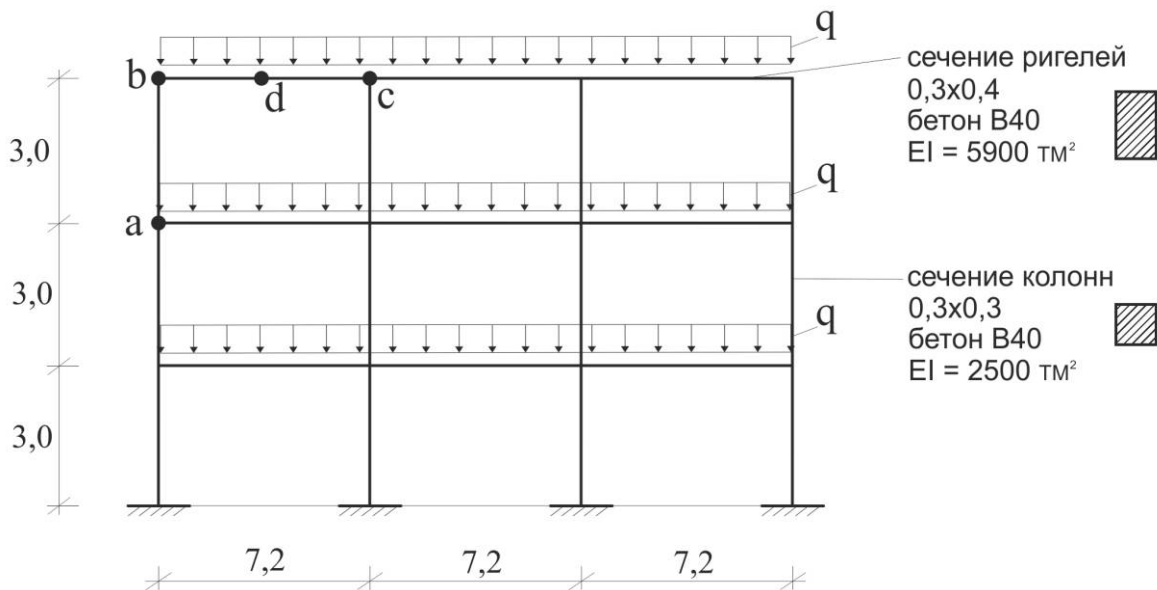


Рисунок 5. Расчетная схема исследуемой конструкции.

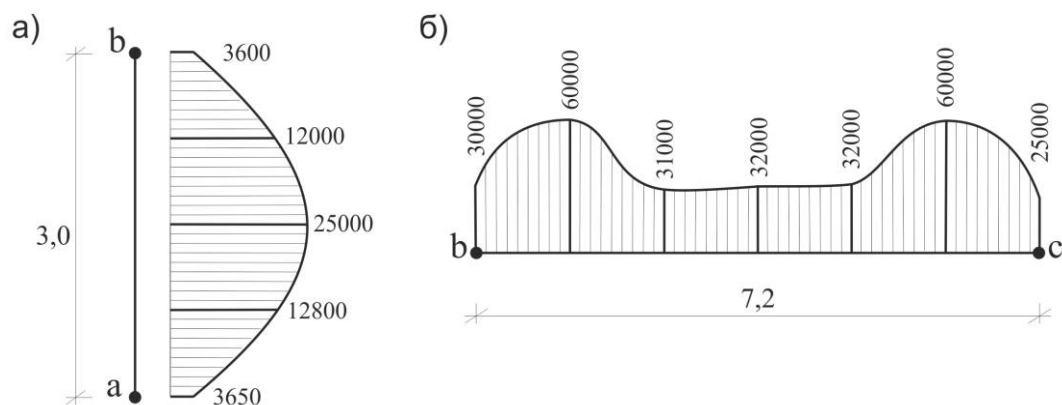


Рисунок 6. Эпюры жесткостей EI $тм^2$ полученных на основе расчета по методу «Инженерная нелинейность»: а) для колонны, б) для ригеля.

Анализируя эпюры жесткостных характеристик можно сделать вывод, что рекомендуемое нормативами снижение жесткостных характеристик для колонн на понижающий коэффициент 0,6 (в этом случае эпюра для колонн выглядела бы постоянной и равной $0,6 \times 2500 = 1500$ $тм^2$) и для ригелей 0,3 (в этом случае эпюра выглядела бы постоянной и

равной $0,3 \times 5900 = 1770$ $тм^2$) выглядит достаточно грубым приближением.

В таблице 1 приведены результаты линейно-упругого расчета рамы на нагрузку $q = 20$ т/п.м. с учетом дифференцированного распределения жесткостей для всех элементов, полученных на основе режима «Инженерная нелинейность».

Таблица 1. Результаты линейно-упругого расчета рамы.

Вид расчета	Значение параметров НДС	Статический расчет			Динамический расчет	
		Момент в ригеле «в – с» в узле «в» в тм	Момент в ригеле «в – с» в узле «d» в тм	Перемещение в узле «d» в тм	Частота ω в герцах	Период T в сек.
линейно-упругий расчет с начальными жесткостями		58,4	100,7	54,0	0,182	5,51
линейно-упругий расчет с жесткостями полученными на основе режима «Инженерная нелинейность»		74,3	84,5	113,0	0,158	6,32

Анализируя результаты расчета приведенные в таблице 1 можно сделать следующие выводы:

- получено некоторое перераспределение усилий – в менее нагруженном сечении «в» ригеля момент увеличился, в более нагруженном сечении «d» ригеля момент уменьшился;

- перемещение узла «d» увеличилось более чем в 2 раза;
- частота собственных колебаний (первая форма) уменьшилась, а период увеличился.

ВЫВОДЫ

В заключение еще раз следует отметить, что метод «Инженерная нелинейность» предназначен только для учета пониженной жесткости железобетонных конструкций в массовых инженерных расчетах и ни в коем случае не заменяет расчет с учетом физической нелинейности.

Метод «Инженерная нелинейность» реализован в программном комплексе ЛИРА-САПР. Таким образом, инженеры-проектировщики получили еще один инструмент, позволяющий учитывать в практических расчетах влияние пониженной жесткости железобетонных конструкций на НДС проектируемого сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондаренко В.М.** Инженерные методы нелинейной теории железобетона. – М.: Стройиздат, 1982. – 287 с.
2. **Барабаш М.С.** Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства. – К.: «Сталь», 2014. – 301 с.
3. **Городецкий А.С., Здоренко В.С.** К расчету физически нелинейных плоских рамных систем. // Строительная механика и расчет сооружений, 1969, №4, с. 61-68.
4. **Пикуль А.В., Городецкий Д.А.** Определение жесткостных характеристик сечения железобетонного стержня с учетом нелинейных свойств материала. // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов IV Международного симпозиума. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012, с. 228.
5. **Городецкий А.С., Барабаш М.С.** Учет нелинейной работы железобетонных конструкций в практических расчетах. // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. трудов. –

Дн-вск: ПГАСА, 2014. – Вып. 77. – С. 54–59.

6. **Городецкий А.С.** Компьютерное моделирование процесса нагружения железобетонных конструкций. Сборник научных трудов Луганского национального университета, серия «Технические науки» N49/52. – Л.: Издательство «ЛНАУ», 2004, с. 3-10.

Городецкий Александр Сергеевич – академик РААСН, академик Академии строительства Украины, заместитель директора ООО «ЛИРА САПР», доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий Киевского национального университета строительства и архитектуры, 03680, Украина, г. Киев, проспект Воздухофлотский, 31; тел: +38(044) 590 58 90; +38(050)3519661; e-mail: acegor@mail.ru, http: www.liraland.ru

Барабаш Мария Сергеевна – академик Академии строительства Украины, директор ООО «ЛИРА САПР», доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных технологий строительства Института аэропортов, Национального авиационного университета, 03058, Украина, г. Киев, проспект Космонавта Комарова, д. 1; тел: +38(044) 590 58 87; +38 (095) 286-39-90; e-mail: bmari@ukr.net, http: www.liraland.ru

Aleksander S. Gorodetsky, Foreign Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Academician of the Academy of Construction of Ukraine, Deputy Director of "LIRA SAPR" Ltd, DSc (Eng.), doctor of technical sciences, Professor, Professor of Department of Information Technology, Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Povitroflotsky Avenue, 03680, Kiev, UKRAINE. phone: +38(044) 590 58 93; e-mail: acegor@mail.ru, http: www.liraland.ru

Maria S. Barabash – Academician of the Academy of Construction of Ukraine, the director of "LIRA SAPR" Ltd, DSc (Eng.), doctor of technical sciences, Associate Professor, Professor of Department of Computer Technology Building, Institute of Airports, National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova, 03058, Kiev, UKRAINE. phone: +38 (095) 286-39-90; e-mail: bmari@ukr.net. http: www.liraland.ru